

МОЩНЫЕ УСИЛИТЕЛИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Усилители колебаний сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона высокой мощности применяются в передающих устройствах радио- и телевизионного вещания, мобильной связи, ретрансляционном, радиолокационном и радионавигационном оборудовании, в ускорителях заряженных частиц, устройствах бытового и промышленного нагрева, медицинской аппаратуре. Особое внимание при их разработке уделяется вопросам обеспечения высоких значений тока и напряжения, необходимого коэффициента полезного действия, отвода рассеиваемой мощности, предотвращения электрического пробоя. Технические решения, основанные на твердотельной полупроводниковой электронике, позволяют получить выходную мощность менее 1 кВт на частотах 1–2 ГГц. Однако при повышенных требованиях к мощности, граничной частоте и линейности режима усиления широкополосного сигнала они не всегда пригодны для реализации нужной системы. В таких случаях используют вакуумные СВЧ-устройства. Надеемся, что представленный материал познакомит читателя с современным уровнем техники мощных усилительных СВЧ-узлов, с тенденциями и перспективами их развития.

Для усилительных СВЧ-узлов малой и средней мощности при выходной колебательной мощности менее 1 Вт в диапазоне частот 0,3–100 ГГц преобладают технические решения, использующие полупроводниковые приборы для поверхностного монтажа или в интегральном исполнении [1]. Они обеспечивают коэффициент усиления одного каскада 15–20 дБ, а при каскадировании – до 60 дБ; КПД – до 45%;

широкополосность – 0,1–5 ГГц; уровень собственных шумов – 0,5–5 дБ; диапазон изменения мощности входного сигнала без нелинейных искажений или без недопустимого ухудшения отношения сигнал/шум – 30–40 дБ.

Известно, что на заданной частоте наибольшая выходная мощность узла, выполненного на единичном активном элементе, обратно пропорциональна квадрату рабочей площади этого элемента. Поэтому при классификации усилителей по мощности надо учитывать диапазон рабочих частот. Суммирование высокочастотных колебаний от многих активных элементов позволяет повысить уровень выходной мощности, но при этом возникают сложности, связанные с конструкцией и КПД устройств разветвления и суммирования, с обеспечением фазовой идентичности суммируемых каналов и с предотвращением паразитного самовозбуждения.

При использовании в системах многоканальной радиосвязи, телевизионных вещательных передатчиках, наземных и спутниковых ретрансляторах, кроме обеспечения нужного уровня мощности и КПД, особое значение приобретает возможность работы в расширенном диапазоне линейного усиления, при котором перекрестные и взаимные нелинейные искажения остаются в допустимых пределах.

Некоторые из указанных проблем легче решаются при использовании вакуумных приборов, отличающихся к тому же значительно более высокой стойкостью к радиационным воздействиям, что особенно важно для ряда применений. Для традиционных вакуумных активных приборов характерно высокое напряжение питания – порядка десятков киловольт, что затрудняет их применение в бортовой и спутниковой аппаратуре. Но современные многоручьевые конструкции уже обеспечивают высокую и сверхвысокую мощность при рабочих напряжениях, пониженных до единиц киловольт. Поэтому, несмотря на интенсивное развитие полупроводниковых

Л. Белов



СВЧ-приборов, по-прежнему продолжается разработка и совершенствование вакуумных усилителей, а также комплексированных изделий, включающих в себя вакуумные и твердотельные узлы [2].

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 10 Вт

Большинство производителей твердотельных усилительных СВЧ-устройств предлагают широкую гамму изделий, отличающихся уровнем мощности при одинаковых частотах, наиболее характерные из которых представлены в табл. 1.

Особенность миниатюрной, но мощной GaAs-микросхемы МААРGM0079-DIE (20 Вт на частоте 10,5 ГГц) компании M/A-COM – монтаж на теплоотводящем радиаторе. В сверхмощных усилителях KAW5080 (выходная мощность до 1,8 кВт на частоте 1 ГГц) компании AR Worldwide и МРКМ-14500/R концерна General Dynamics (до 500 Вт на частоте 14,5 ГГц) используется сложение мощностей 8–16 транзисторных субблоков. Кроме того, они оснащены развернутыми подсистемами управления, модуляции, расширения динамического диапазона линейности. В выходном каскаде сверхмощного высоколинейного усилителя миллиметрового диапазона 40T26G40A (до 45 Вт на частоте 40 ГГц) концерна SATCOM Technologies применяется сложение мощностей восьми GaAs-транзисторов.

Среди отечественных мощных твердотельных усилителей можно выделить твердотельные телевизионные передатчики СИГМА мощностью до 1 кВт в дециметровом диапазоне длин волн, созданные специалистами отдела систем телевидения

и радио Московского технического университета связи и информатики.

МОЩНЫЕ ВАКУУМНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Вакуумные активные элементы мощных СВЧ-усилителей достаточно разнообразны. К ним относятся *однолучевые* пролетные многорезонаторные *клизтроны*, характерные значения выходной мощности которых в непрерывном режиме не превышают 50 кВт. Получили развитие *многолучевые клизтроны* (МЛК), способные одновременно возбуждать колебания множества (от 8 до 36) лучей, выходная мощность которых суммируется. Благодаря этому плотность электронного потока уменьшается и облегчаются условия рекуперации – возвращения в источник питания энергии электронов, попадающих на коллектор. Появившийся на рынке в 90-е годы *клизотрод* (Inductive Output Tube – IOT) [3] представляет собой комбинацию клизтрона и тетрода: входной поток электронов модулируется по плотности, как в тетроде, и по скорости, как в клизтроне, а отбор мощности сгруппированного потока соответствует механизму, используемому в клизтроне. Прибор этого типа отличается повышенными КПД и линейностью усиления при высокой мощности, что предопределяет его широкое применение в телевизионных передатчиках дециметрового диапазона. В *многолучевом клизтроне* снижается требуемое напряжение питания и упрощается реализация управляющих сеток. Конкурентоспособные клизтроны выпускаются в России. Сопоставление параметров 18-лучевого клизтрона мощностью 64 кВт на диапазон 0,47–0,81 ГГц, созданного в ГНПП "Исток", и подобного при-

Таблица 1. Мощные твердотельные усилители СВЧ

| Модель, сайт | Особенность | Полоса частот, ГГц | Выходная мощность, Вт | Коэффициент усиления, дБ | Напряжение питания, В | Потребляемый ток, А | Размеры, см |
|--|--------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|---------------|
| СИГМА, www.sigma-mtuci.ru | ТВ; Ц | 0,05–0,8 | 550 | 40 | 2000* | – | 480×177×560 |
| KAW5080, www.ar-worldwide.com | Мод, КП, ВО | 0,08–1 | 1800 | 63 | 24000* | – | 56×146×96 |
| CBPO1025049, www.cernex.com | О | 1–2 | 80 | 50 | 15 | 33 | 8,5×3,4×1,1 |
| SCGA1960-43B, www.ameramp.com | ВЛ, CDMA | 1,86–2 | 10 | 60 | 12 | 6 | 17×7×3 |
| AR178228-300, www.comtechpst.com | ВЛ | 1,7–2,1 | 300 | 55 | 208* | – | 40×48×66 |
| QBS-368, www.amplifonix.com | ВУ, ВМ, К | 2,4–2,45 | 40 | 32 | 15 | 10,5 | 16×10×2 |
| 3061-GCM515KK1, www.empowerrf.com | ЭМС; Ком; ВЛ | 2,4–2,5 | 100 | 40 | 28 | 12 | 32×19×3 |
| SLD2000, www.sirenta.com | ВЭ | 0,3–2,7 | 12 | 18 | 12 | 1 | 0,2×1×0,1 |
| 5303009, www.ophirrf.com | МГ, ВЛ, О | 2–4 | 25 | 12 | 13 | 12 | 22×25×3 |
| DBN-4237N639, www.narda-microwave.com | МГ, Ст | 3,7–4,2 | 8 | 45 | 12 | 5 | 11×6×2 |
| 5964B70, www.kmicotechnology.com | ВЛ | 5,9–6,4 | 100 | 60 | 13 | 60 | 27×22×4 |
| S022CI, www.cpii.com | КП | 5,8–6,4 | 225 | 70 | 1500* | – | 48×13×66 |
| 33811-6.4-7.2-25-10, www.mw-elisra.com | ДД-30 | 6,4–7,2 | 20 | 10 | 15 | 14 | 3×6×15 |
| AP0/080-3942, www.cttinc.com | О | 4–8 | 42 | 42 | 15 | 10 | 15×10×5 |
| МААРGM0079-DIE, www.macom.com | Чип, Ст | 7,5–10,5 | 20 | 29 | 10 | 6 | 0,5×0,8×0,008 |
| SSPA 9.8-10.8-10, www.aethercomm.com | БК | 9,5–10,5 | 15 | 80 | 12 | – | – |
| AHP-1414HP12, www.aldetec.com | ВЛ, МГ | 14–14,5 | 30 | 10 | 12 | 7 | 11×2×5,8 |
| MPKM-14500/R, www.tripointglobal.com | Шк, ВО | 14–14,5 | 500 | 70 | 6400* | – | 48×58×69 |
| SSPA 24.0-32.0-20, www.rell.com | ВМ, ВУ | 24–32 | 10 | 40 | 12 | 22 | 12×17×2 |
| 40T26G40A, www.ar-worldwide.com | ВЛ, ШП | 26,5–40 | 45 | 46 | 850* | – | 50×16×68 |

Примечание. БК – быстрая коммутация питания – 500 нс; К – компактный; ВЛ – высокая линейность; ВМ – высокая мощность; ВО – воздушное охлаждение; ВУ – высокое усиление; ВЭ – высокая экономичность; ДД-30 – динамический диапазон входного сигнала 30 дБ; Ком – коммутация мощности за 1 мкс; КП – контрольная панель; МГ – малогабаритный; Мод – встроенный модулятор, О – октавная полоса; Ст – встроенный стабилизатор напряжения питания; ТВ – телевизионный; Чип – сверхминиатюрная микросхема; Ц – аналого-цифровой входной сигнал; Шк – шкаф; ШП – широкополосный; ЭМС – встроенный фильтр внеполосных излучений по нормам электромагнитной совместимости; * – потребляемая мощность, Вт.

Таблица 2. Мощные вакуумные усилители СВЧ

| Модель, сайт | Тип | Особенность | f, ГГц | P _{вых} , кВт | k _{ро} , дБ | W, МГц | Δ _{гвз} , нс/МГц | δ _{АФ} , °/дБ | P _{потр} , кВт | m, кг |
|--|----------|-----------------|-----------|------------------------|----------------------|--------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------|
| IOTD3130W, www.e2vtechnologies.com | Клистрод | ТВ | 0,47–0,81 | 88 | 23 | 400 | – | – | 140 | 28 |
| TH 2103, www.thalesgroup.com | Клистрод | ДИ | 3,7 | 500* | 45 | 500 | – | – | – | н/д |
| "Истрон", ГНПП "Исток" ¹⁾ | Клистрод | 18-ЛКд | 0,47–0,81 | 64 | 24 | 350 | – | – | 102 | н/д |
| Усилитель ГНПП "Исток" ²⁾ | Клистрод | 36-ЛК | 1,9–2,1 | 20 (1000*) | 43 | 200 | н/д | н/д | н/д | 38 |
| SSK-1 S-Band, www.tripointglobal.com | Клистрод | Защ, WR-430 | 1,7–2,1 | 2,1 | 75 | 8 | 3 | 4 | 10 | 45 |
| TH 2158, www.thalesgroup.com | Клистрод | Уск | 2,86 | 60 (5000*) | 30 | – | – | – | 150 | н/д |
| СМ5, ГНПП "Исток" ³⁾ | МСМ | Э | 6 | 0,025 | 20 | 30 | – | – | 0,054 | 0,25 |
| УВ321, www.pluton.msk.ru | ЛБВ | К | 5,9–6,4 | 0,22 | 30 | 500 | – | – | 1 | 2 |
| 3-см усилитель, ГНПП "Исток" ⁴⁾ | Клистрод | М-ЛК | 10 | 20 (280*) | 42 | 2000 | – | – | – | 16 |
| TL06TO, www.cpii.com | ЛБВ | Лин, К | 7,9–8,4 | 0,6 | 72 | 500 | 0,01 | 2,5 | 1,8 | 39 |
| КУ382, ГНПП "Исток" | Клистрод | 10-н | 17,2–18,1 | 1,3 | 43 | 50 | – | – | 34 | 22,5 |
| Ku-Band СКРА, www.cpii.com | Клистрод | WR-75, Мот, Защ | 13–14 | 2,4 | 80 | 85 | 0,1 | 4 | 11 | 86 |
| STA1340, www.e2vtechnologies.com | ЛБВ | Ант, Лин, Атт | 12,7–14,5 | 0,4 | 70 | 800 | 0,01 | 2,5 | 1,5 | 25 |
| VZU-6997AD, www.cpii.com | ЛБВ | К | 13,7–14,5 | 0,75 | 78 | 750 | 0,02 | 2,5 | 2,5 | 43 |
| TH 2486D, www.thalesgroup.com | Клистрод | В | 14–14,5 | 2 | 47 | 80 | – | – | – | – |
| VZU-6995AY, www.cpii.com | ЛБВ | Лин, АРМ, ПЗФ | 17–18 | 0,5 | 75 | 1100 | 0,01 | 2,5 | 2,8 | 43 |
| DBS-Band СКРА, www.cpii.com | Клистрод | Защ, В, Мот | 17,3–18,4 | 2,4 | 75 | 85 | 0,1 | 5 | 11 | 86 |
| TL3990, www.thalesgroup.com | ЛБВ | В | 18–21 | 0,1 | 60 | 1000 | – | – | – | – |
| VZA-6903E, www.cpii.com | Клистрод | К, Атт | 27–31 | 0,55 | 80 | 250 | 0,1 | 4 | 2,5 | 50 |
| T02КО, www.cpii.com | ЛБВ | Атт | 27–31 | 0,25 | 70 | 2500 | 0,01 | 2,5 | 0,8 | 24 |
| 40T26G40A, www.ar-worldwide.com | ЛБВ | ШП | 26–40 | 0,04 | 46 | 14000 | – | – | 0,85 | 37 |

Примечание. Ант – монтируемый на антенне; АРМ – встроенная автоматическая регулировка мощности; Атт – встроенный аттенуатор 0–25 дБ с шагом 0,1 дБ; В – воздушное охлаждение; ДИ – длинные импульсы; Защ – имеется защита; К – компактная модель; Лин – встроенный линейризатор; М-ЛК – М-лучевой пролётный клистрон; МСМ – миниатюрный синхронизированный магнетрон; Мот – моторизованная перестройка; ПЗФ – встроенный полосно-заграждающий фильтр на полосу приёмника; ТВ – источник телевизионного сигнала; 10-н – 10 фиксированных настроек; WR – волноводный соединитель; Э – высокий энергетический КПД.; Уск – источник мощности для ускорителя ионов; ШП – широкополосный; ¹⁾ – [2], стр. 30; ²⁾ – [2], стр. 22; ³⁾ – [2], стр. 36; ⁴⁾ – [2], стр. 20, табл. 1.1; * – мощность в импульсном режиме

бора 10E8404 ведущей английской фирмы E2V Technologies показало преимущества отечественного изделия по КПД и по коллекторному напряжению [2]. Сведения о российском клистроде приведены в [3].

Интересная разновидность клистрода – лампа с энергосберегающим коллектором и индуктивным выходом ESCIOT (Energy Saving Collector Inductive Output Tube) фирмы E2V. В приборе этого типа используется каскадное соединение промежуточного клистрода и выходного усилительного клистрона с охлаждаемым водой коллектором. Выходная мощность ламп ESCIOT в непрерывном режиме достигает 100 кВт

в диапазоне частот 11–44 ГГц при КПД до 60% и полосе частот 50 МГц.

Мощность ламп бегущей волны (ЛБВ) типа О со спиральной замедляющей системой малого диаметра составляет 200 Вт на частотах 10–15 ГГц при КПД до 60%, относительной широкополосности 1–2 октавы и долговечности до 150 тысяч часов [2]. Применение периодической замедляющей системы в ЛБВ позволяет увеличить ее рабочую частоту и повысить КПД, но при этом полоса частот входного сигнала уменьшается. Многолучевые ЛБВ компактны и работают при меньших значениях питающего напряжения в срав-

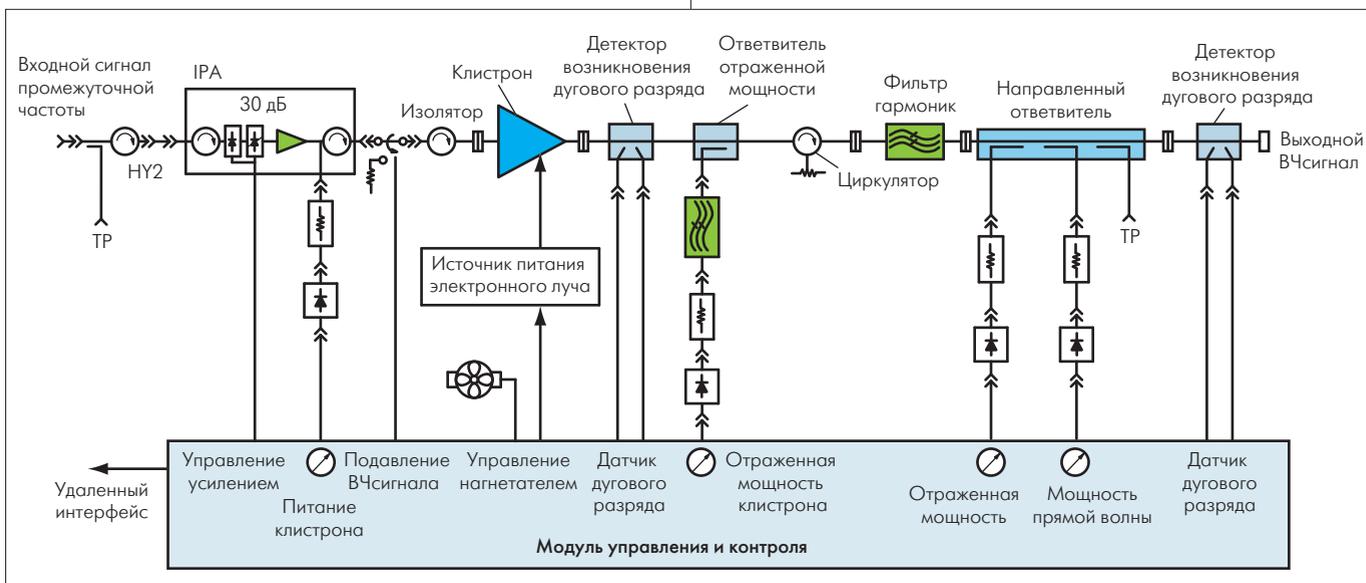


Рис. 1. Структурная схема комплексированного изделия марки SSK-1 фирмы General Dynamics (частота 1,7–2,1 ГГц; мощность 2,5 кВт; усиление 75 дБ)



Рис.2. Твердотельный усилитель 3061-GCM515KK1 фирмы Eprpowerff (полоса частот до 2,5 ГГц, выходная мощность 100 Вт)

нении с ЛБВ типа О и с периодической замедляющей системой. Амплитрон, представляющий собой усилительный прибор со скрещенными электрическим и магнитным полями и разделенными входной и выходной цепями, обеспечивает наиболее высокий для вакуумных СВЧ усилительных элементов КПД (до 90%) и сверхвысокую мощность при синхронизации частоты автоколебаний внешним узкополосным сигналом. Миниатюрный синхронизированный магнетронный усилитель (МСМ) выполнен на основе более простой комбинации автогенераторного магнетрона и ферритового циркулятора, разделяющего синхронизирующий входной и выходной сигналы. В *гиротронных усилителях* используется полый винтовой электронный поток и непрерывное взаимодействие с бегущей волной, как в ЛБВ, что обеспечивает КПД до 70% в миллиметровом диапазоне длин волн при мощности до 100 кВт в течение нескольких десятков секунд.

Примеры известных на мировом рынке мощных вакуумных усилительных устройств представлены в табл.2. В качестве параметров для сопоставления выбраны: интервал рабочих частот (f), выходная мощность в непрерывном режиме насыщения ($P_{\text{вых}}$), малосигнальный коэффициент усиления ($k_{\text{р0}}$), ширина полосы частот сигнала (W), линейная составляющая неравномерности группового времени запаздывания в полосе усиления ($\Delta_{\text{ГВЗ}}$), наибольшее значение коэффициента АМ/ФМ преобразования ($\delta_{\text{АФ}}$), мощность потребления от источника питания переменного тока ($P_{\text{потр}}$), масса радиочастотного блока (m).

Наиболее высокие показатели качества и расширенные функциональные возможности достигаются в *комплексированных изделиях* (КИ), дополненных невзаимными пассивными узлами, блоками электропитания, управления параметрами и автоматическими средствами регулирования. Пример такого КИ – модель SSK-1 фирмы General Dynamics представлен на рис. 1, внешний вид 100-Вт транзисторного усилителя фирмы Eprpowerff – на рис. 2.

Для усилителей телевизионного сигнала разрабатываются ЛБВ с непрерывной мощностью 180–400 Вт в диапазоне частот 13–14 ГГц, оптимизированные по линейности амплитудной характеристики. Для выполнения требований электро-

магнитной совместимости в них встроены средства формирования маски амплитудно-частотной характеристики.

При уровне мощности 0,1–1 кВт в диапазоне частот 1–4 ГГц твердотельные устройства успешно конкурируют с усилителями на спиральных ЛБВ (рис.3). Ряд фирм (например, израильская Elisra) разрабатывают для этой ниши твердотельные усилители, заменяющие известные усилители на ЛБВ. Ряд производителей выпускают вакуумные и твердотельные модели с близкими параметрами. На сайте компании Communications & Power Industries (www.cpii.com) приведены результаты сравнения характеристик транзисторного усилителя SSCI-200 с номинальной мощностью 200 Вт и усилителя на ЛБВ типа VZC-6964A4 с номинальной мощностью 400 Вт, функционирующих в полосе частот 0,5–6,4 ГГц и сопоставимых по малосигнальному коэффициенту усиления (80 дБ). Показано, что усилители на ЛБВ превосходят твердотельные устройства на 3–6 дБ по уровню мощности насыщения и по паразитным нелинейным эффектам в области линейного усиления. Они отличаются более низким уровнем АМ/ФМ преобразования сигнала, значительно более высоким КПД (50–60% для VZC-6964A4 против 25–30% для SSCI-200). Однако усилители на ЛБВ проигрывают по массогабаритным показателям и по напряжению источников питания.

Широкое распространение получили мощные усилители и генераторы СВЧ-колебаний различного назначения, производимые французской корпорацией Thales Group. Ее клистроны, клистроды, магнетроны, гиротроны работают в оборудовании США, Канады, Китая, Швейцарии, Великобритании, Японии. Клистроны средней мощности на полосу частот до 18,4 ГГц отличаются высокоскоростной перестройкой на любую из 50 фиксированных частот за время менее 1 с. Спиральная ЛБВ модели TH3998 обеспечивает 8 кВт импульсной мощности со скважностью 20 в диапазоне 2–4 ГГц; ЛБВ модели TH4428 – 40 Вт в полосе 18–40 ГГц или 80 Вт в полосе 25–33 ГГц. Мгновенная полоса частот сигнала, усиливаемого ЛБВ этой корпорации с периодической замедляющей системой, составляет 5–10%, интервал частот – 3–94 ГГц, уровень мощности – 1 МВт в импульсе (20 кВт



Рис.3. Блок антенного усилителя на ЛБВ марки STA1340 фирмы E2V Technologies (полоса частот 13–14,5 ГГц, выходная мощность – 400 Вт, усиление – 45 дБ, масса – 25 кг)

в непрерывном режиме) на частоте 2,3 ГГц, 120 кВт в импульсе (4 кВт в непрерывном режиме) на 8 ГГц, 150 Вт в импульсе (20 Вт в непрерывном режиме) на 44 ГГц. Уровень мощности сверхмощного многорезонаторного клистрона модели TH2132 – 45 МВт за 4,5 мкс или 150 МВт за 1 мкс при КПД 65%.

Гиротроны фирмы Thales Group обеспечивают генерацию импульсных, большой длительности или непрерывных сверхмощных колебаний. Рекордная мощность, достигнутая с помощью гиротрона TH1507, составляет 1 МВт в непрерывном режиме на частоте 140 ГГц (!). Усилитель магнетронного типа со скрещенными полями (Crossed-field amplifiers, CFA) TH4310A, предназначенный для наземных и бортовых радиолокаторов, обеспечивает на частоте 2,3 ГГц импульсную

мощность 660 кВт или непрерывную 10 кВт при усилении 50 дБ.

Заметные достижения в технике генерирования и усиления мощных колебаний СВЧ имеются и у отечественных производителей [2].

На сайте фирмы РАДИОКОМП (<http://www.radiocomp.ru>) представлена обширная база данных по различным типам усилителей СВЧ-диапазона, а ее специалисты могут помочь в приобретении необходимых компонентов с учетом известных ограничений, установленных компаниями-производителями электронной техники. К сожалению, известные на открытом рынке конкурентоспособные изделия отечественных производителей не сопровождаются необходимым уровнем информационного и сервисного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Л.А. Усилители радиочастотных сигналов. ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, № 5, с.46.а
2. Генераторы и усилители СВЧ/Под ред. И.В. Лебедева. – М.: "Радиотехника", 2005. – 352 с.
3. Королев А., Лопин М., Мишкин Т., Победоноцев А. Многолучевой клистрод для телевидения. ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 1998, № 2, с. 23.